



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析

时义磊, 曹智, 周律

引用本文:

时义磊, 曹智, 周律. 农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 677–685.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0340>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国农村厕所改造的区域特征及路径探析

王永生, 刘彦随, 龙花楼

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 553–560 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0245>

三格化粪池厕所的功能定位及在农村改厕中的应用误区

张玉, 吕明环, 徐明杰, 李傲, 施云鹏, 李亚惠, 范彬

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 215–222 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0231>

基于ISM模型的山东省农村生活环境污染影响因素分析

孙艺榛, 郑军

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 576–581 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0182>

$\text{BiFeO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 类芬顿体系去除猪场沼液中3种磺胺类抗生素

靳渝鄂, 周文兵, 肖乃东, 蔡建波, 蔡欢, 王硕丰

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 945–950 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0449>

巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算

丁健, 吴晓斐, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 郑宏杰

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 584–591 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0205>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

时义磊, 曹智, 周律. 农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 677-685.

SHI Yi-lei, CAO Zhi, ZHOU Lü. Rural toilet systems implementing resource recovery: Available techniques and benefit analysis[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(4): 677-685.



开放科学 OSID

农村资源化公共厕所技术和实施的效益分析

时义磊, 曹智, 周律*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要:为更好地指导农村地区因地制宜地实现生活污水资源化,在对资源化厕所技术研究现状进行综述的基础上,通过费用效益分析和生命周期评价分别研究了7种情景下资源化厕所系统的经济与环境效益(A:完整下水道式水冲厕所;B₁~B₂:仅对尿液进行资源化处理;C₁~C₄:对厕所污水(即黑水)同时进行资源化处理)。结果表明:情景B₁、情景B₂与情景A的经济效益接近,而情景C₁~C₄的经济净现值相对情景A的经济净现值分别提高了72.96万元(增幅81.74%)、49.65万元(增幅55.62%)、52.28万元(增幅58.57%)、24.05万元(增幅26.94%);相对于情景A,情景C₁~C₄在除土壤生态毒性之外的所有环境影响类型上均具有更优的环境效益。研究表明,对粪尿同时进行资源化处理的资源回收型厕所系统比传统水冲厕所以及仅对尿液进行资源化处理的厕所系统具有更高的经济和环境效益。

关键词:厕所;厕所污水;资源回收;费用效益分析;生命周期评价

中图分类号:R127;X799.3 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)04-0677-09 doi: 10.13254/j.jare.2020.0340

Rural toilet systems implementing resource recovery: Available techniques and benefit analysis

SHI Yi-lei, CAO Zhi, ZHOU Lü*

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To provide systematic guidance on resource recovery from domestic wastewater in rural areas, our study reviewed the techniques of resource-oriented toilet use and conducted a cost-benefit analysis combined with life cycle assessment to reveal the economic and environmental benefit of toilet systems under seven different scenarios (A: traditional water closed latrine; B₁~B₂: resource-oriented toilet, recovery from urine only; C₁~C₄: resource-oriented toilet, recovery from both urine and feces, i.e. black water). The result showed that scenario B₁~B₂ were similar to scenario A considering the economic benefit whereas economic net present value of scenario C₁~C₄ were higher than that of scenario A (CNY 7.296 × 10⁵; CNY 4.965 × 10⁵; CNY 5.228 × 10⁵; CNY 2.405 × 10⁵ separately). Moreover, the environmental benefits of scenario C₁~C₄ were higher than those of scenario A considering all studied impact categories except terrestrial ecotoxicity potential. The conclusion indicates that the toilet system resource recovery in both urine and feces has more economical and environmental benefits than the toilet system of only recovering resource in urine and the traditional water closed latrine.

Keywords: toilet; black water; resource recovery; cost-benefit analysis; life cycle assessment

目前,中国城镇基本实现了污水的全收集,但农村污水仍未得到较好的处理^[1],农村厕所的排污是农村污水的主要来源,已对农村环境产生比较严重的负面影响。此外,为了应对盲目过量施用化肥导致的耕

地退化问题,2015年农业部也提出了2020年化肥使用量零增长的目标^[2]。而实现这一目标的重要手段之一就是提高农村污水中粪尿的资源化利用^[3]。2017年我国人均化肥消耗量可达氮肥(以N计)每年

收稿日期:2020-06-28 录用日期:2020-09-08

作者简介:时义磊(1992—),男,安徽淮南人,硕士研究生,从事水污染控制相关研究。E-mail: shiyl16@mails.tsinghua.edu.cn

*通信作者:周律 E-mail: zhoulu@mail.tsinghua.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408700)

Project supported: National Key R&D Program of China(2019YFC0408700)

<http://www.aed.org.cn>

每人 15.98 kg、磷肥(以 P 计)每年每人 5.74 kg、钾肥(以 K 计)每年每人 4.46 kg,而将人类粪尿中富含的氮、磷、钾等营养物质经资源化处理后用作肥料在农村地区具有重大现实意义^[4-5]。

2015年,农业部印发了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,要求提高农业生产中有机肥资源利用率。2020年7月14日农业农村部等三部委印发了《农村厕所粪污无害化处理与资源化利用指南》和《农村厕所粪污处理及资源化利用典型模式》等文件,进一步指导农村资源化厕所的建设与发展。本研究对农村初步调查也表明,广大村民对于建设和使用资源化厕所所有极高的热情。

近年来,粪尿资源化技术不断取得突破,出现了各种新型的资源化厕所系统,但如何在不断趋严的农村环保标准之下,将资源化厕所与农村特点相结合,为不同农村地区因地制宜地提供改厕技术方案仍然缺乏系统性的指导。因此,本研究在分析不同粪尿资源化技术研究现状的基础上,设计适合北京某农村地区的资源化公厕系统,分析在不同情境下推广资源化厕所可实现的经济与环境效益,为我国农村地区厕所资源化技术选用和农村水污染控制提供建议。

1 材料与方法

1.1 资源化厕所系统设计

为建设适用于农村地区的资源化厕所系统,笔者

按照下述研究步骤开展了调研、试验与设计等工作。

(1)首先通过文献调研总结了粪尿资源化的常见技术,并通过实地调研、与专业人士交流、参观展览等方式,分析了目前资源化厕所系统的研究现状。

(2)基于调研结果,对现有的黄水资源化技术(氨氮吹脱、鸟粪石结晶、正渗透膜)进行集成,并通过小试试验验证其运行效果,试验所需原料、试剂及材料见表1。试验步骤:取黄水 500 mL 于瓶中,投加 5 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$,设置吹脱风量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,进行连续 1 600 min 的吹脱,测定反应过程中氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度变化, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度通过纳氏试剂法检测;吹脱试验完成后,使用抽滤瓶及分析滤纸对 1 号瓶内的黄水进行过滤,对所得的固体样品进行干燥处理;将过滤后的黄水作为原料液进行水通量(J_w)测试,测试装置见图1,测试条件见表2。

1.2 资源化厕所系统效益评价

在完成技术验证后,笔者将集成技术和褐水厌氧发酵技术结合,考虑北京市某农村地区的特点,设计了适用于该地区的全资源回收型厕所系统,研究资源回收型厕所系统在不同应用情景下的环境效益和经济效益,并与传统水冲厕所进行对比。公厕前段,配置 2 个男士小便器、2 个男士大便器、6 个女士大便器的公共厕所每日可服务 780 名女士和 800 名男士。假设公厕后端采用不同的排放或资源化技术,具体分为情景 A、B₁、B₂、C₁、C₂、C₃、C₄七种系统。公厕的前端和

表1 试验所需原料、试剂及材料
Table 1 Experimental materials and reagents

名称 Item	规格 Specification	用途 Application	来源 Source
黄水	—	黄水资源化测试原料	清华大学附属小学,清华大学环境学院
褐水	—	褐水资源化测试原料	清华大学附属小学
氢氧化钙	分析纯	调节 pH、形成 Ca-P 结晶、杀菌等	国药集团
浓硫酸	分析纯	吸收吹脱后的氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)	国药集团
氢氧化钠	分析纯	中和过量硫酸、调节 pH	国药集团
氢氧化钾	分析纯	中和过量硫酸	国药集团
草木灰	—	中和过量硫酸	自制
盐酸	分析纯	调节 pH	国药集团
煤基活性炭	—	过滤	Jingke 活性炭公司
生物炭	—	过滤	自制
滤纸	分析滤纸	过滤	杭州特种纸业公司
正渗透膜	FO-CTA8040-85	正渗透水通量测试	FTS 公司(美国)
正渗透膜	CTA(NW4040)	正渗透水通量测试	HTI 公司(美国)
氯化钠	分析纯	汲取液制备	国药集团
次氯酸钠	分析纯	膜表面清洗	国药集团
柠檬酸	分析纯	膜表面清洗	国药集团

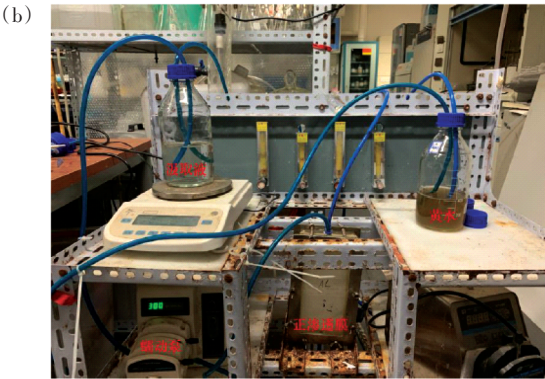
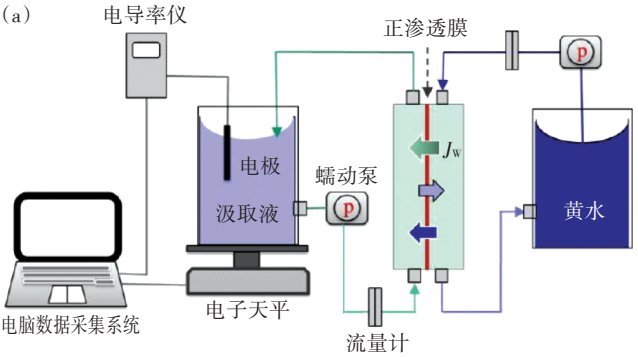


图 1 水通量测试装置模型图(a)及实物图(b)
Figure 1 The model(a) and photo show(b) of water flux testing device

表 2 水通量测试条件

Table 2 Water flux testing conditions

序号 Number	项目 Items	参数 Parameters
1	温度、气压	室温、标准大气压
2	原料液	过滤后黄水, 250 mL
3	汲取液	$3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$, 250 mL
4	正渗透膜	单张美国 FTS 公司 FO-CTA-8040-85 正渗透膜
5	膜组件形式	平板膜
6	流动方式	$0.6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 错流
7	有效接触面积	$13.5 \text{ cm} \times 9.5 \text{ cm}$
8	质量测试间隔时间	60 s

后端组成了完整的公厕系统。

1.2.1 情景设置

所设置的研究情景如表 3 所示。

情景 A: 完整下水道式水冲厕所, 采用常规节水便器, 利用自来水进行冲厕, 之后粪尿污水进入储粪池, 进而通过市政排水管网排至集中式污水处理厂进行处理; 情景 B: 部分资源回收型厕所系统, 采用负压源分离便器, 利用自来水及正渗透(Forward osmosis, FO)-反渗透(Reverse osmosis, RO)系统回收所得的

表 3 资源化厕所系统应用情景

Table 3 Application scenarios of resource-oriented toilet system

情景 Scenarios	供水 Water supply	排水 Water drainage	黄水资源化 Yellow water recycling	褐水资源化 Brown water recycling	供电形式 Power supply
情景 A	√	√	×	×	电网
情景 B ₁	√	√	√	×	太阳能电池供电
情景 B ₂	√	√	√	×	电网
情景 C ₁	√	×	√	√	太阳能电池供电
情景 C ₂	√	×	√	√	电网
情景 C ₃	×	×	√	√	太阳能电池供电
情景 C ₄	×	×	√	√	电网

回用水进行冲厕, 对收集得到的黄水进行资源化处理(先吹脱结晶回收硫酸铵固体, 再沉淀过滤获得缓释肥, 最后通过 FO-RO 系统获得再生水), 而褐水则进入化粪池, 进而通过市政排水管网排至集中式污水处理厂进行处理, 其中情景 B₁ 利用太阳能电池板进行供电, 而情景 B₂ 则利用市政电网进行供电, 此情景适用于有一定市政供排水管网的农村地区; 情景 C: 完全资源回收型厕所系统, 采用负压源分离便器, 在完全利用 FO-RO 系统回收所得的回用水的基础上, 情景 C₁ 和情景 C₂ 利用自来水补充缺少的冲厕水, 情景 C₃ 和情景 C₄ 则利用 FO-RO 系统处理其他地表水来补充缺少的冲厕水, 在部分资源回收型厕所系统的基础上, 将褐水和其他废弃物(畜禽粪便、餐厨垃圾、作物秸秆等)混合进行厌氧发酵, 其中情景 C₁、情景 C₃ 利用太阳能电池板进行供电, 而情景 C₂、情景 C₄ 利用市政电网进行供电, 情景 C₁、情景 C₂ 适用于有一定市政供排水管网的农村地区, 情景 C₃、情景 C₄ 适用于无供排水基础设施的偏远农村地区。

1.2.2 经济性评价方法

目前大多数政府部门和国际机构都采用费用-效益分析(Cost-benefit analysis, CBA)作为公益性项目的主要经济性评价方法。费用-效益分析中需要剔除转移支付的影响, 并利用影子价格体系, 确保分析中的价格能真实反映实际情况, 同时将间接费用或间接效益等外部效益内部化, 以便从整个国家或社会的角度全面分析项目的经济性, 在费用-效益分析中, 经济净现值(Economic net present value, ENPV)可反映出项目运行周期内的经济性, 目前已被较多地用于评估厕所系统的经济性。本研究采用经济净现值法评估上述 7 种不同厕所系统的经济效益, 其计算公

式如式(1)所示:

$$ENPV = \sum_{t=0}^n [(B_t - C_t) / (1 + i)^t] \quad (1)$$

式中: n 为项目计算年限, a ,本研究中将各个厕所系统的使用年限统一为20 a; B_t 为厕所系统在第 t 年的总效益,万元; C_t 为厕所系统在第 t 年总费用,万元; i 为社会折现率,本研究中厕所系统的社会折现率取8%。

1.2.3 环境效益分析方法

本研究采用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)来分析资源化厕所应用后的环境效益。LCA是一种评价产品(或服务)生命周期内环境影响的方法。由于可以同时考虑建造、使用、废弃等各个阶段,该方法目前广泛应用于市政基础设施的可持续性评估中。假设厕所使用年限为20年。建设阶段、使用阶段、粪尿处理阶段、资源回收阶段、报废阶段的输入输出均纳入研究的系统边界内。LCA计算过程在Gabi 8.0软件中实现,背景数据来自软件自带的数据库。本研究选取的环境影响类别有:化石燃料类非生物资源消耗潜势(Abiotic depletion potential-fossil, ADP-f)、元素类非生物资源消耗潜势(Abiotic depletion potential-elements, ADP-e)、酸化潜势(Acidification potential, AP)、富营养化潜势(Eutrophication potential, EP)、淡水水生生态毒性潜势(Freshwater aquatic ecotoxicity potential, FAETP)、100年全球变暖潜势(Global warming potential, GWP100)、人类毒性潜势(Human toxicity potential, HTP)、海洋水生生态毒性潜势(Marine aquatic ecotoxicity potential, MAETP)、臭氧层破坏潜势(Ozone layer depletion potential, ODP)、光化学物质生成潜势(Photochemical oxidation potential, PCOP)、土壤生态毒性潜势(Terrestrial ecotoxicity potential, TETP),各类环境影响均通过CML-IA方法计算。

2 结果与讨论

2.1 资源化厕所系统设计

粪尿资源化技术的处理对象根据粪尿收集、贮存、

转运设备的不同而有所区别,主要可分为三类:①黄水,即尿液或含少量冲刷水的尿液;②褐水,即不含尿液的粪便污水;③黑水,即粪便、尿液和冲刷水的混合物。其中黄水的氮、磷、钾等营养物质含量较高,而褐水、黑水的干物质含量较高^[6]。故对黄水的资源化处理目标主要是从黄水中回收氮、磷、钾、水等物质,对褐水、黑水的资源化处理目标主要是获得有机肥、沼气等资源或能源。

目前黄水资源化的趋势为先利用浓缩减量技术对尿液进行富集浓缩,之后搭配产氢、产电、鸟粪石结晶、氨氮吹脱等技术实现资源的回收^[17-19],相关的资源化技术可分为氮回收技术、磷回收技术、电化学技术和膜技术四类,技术原理和采取的方法详见表4。

褐水和黑水资源化的主要思路是创造厌氧、高温等不适于粪大肠菌群等病原体生存的环境,在实现粪便无害化、减量化的同时,回收产生的沼气以及其他富含腐植酸类有机物的肥料,主要的技术包括堆肥、厌氧消化、干化焚烧等。表5总结了目前常见的褐水和黑水资源化技术,对技术的成熟度、粪污减量化效果、资源回收效果以及操作条件和成本进行了总结,并归纳了目前技术存在的问题。

搭配前端的粪尿收集装置,可将上述多种资源化技术集成用于设计厕所系统,表6总结了已有的不同技术成熟度的资源化厕所系统。

笔者所在的研究团队在充分调研目前资源化厕所系统开发现状的基础上,在满足用户舒适度体验和公共厕所卫生规范(GB/T 17217—1998)条件下,综合考虑了各种粪尿资源化技术的特点,将吹脱回收氨、结晶回收磷、正渗透膜回收水等黄水资源化技术进行集成。集成技术验证试验结果如图2所示。结果表明:在黄水资源化过程中,该系统可以固态肥料(氮肥和缓释复合肥)的形式高效回收黄水中的氮、磷、钾,回收率分别可达97.43%、99.44%、31.95%;营养物质的回收使得黄水中氨氮浓度大幅降低,试验进行1 000 min后,黄水中氨氮浓度从1 400 mg·L⁻¹降低至50

表4 黄水资源化技术总结

Table 4 Summary of resource recovery techniques of yellow water

类别 Category	原理 Basic principles	方法 Approaches
氮回收技术	利用氨氮的物理化学性质将尿液中的氮进行资源回收或利用	氨氮吹脱 ^[10-11] ;氨氮吸附 ^[12-14] ;藻类吸收 ^[15-16]
磷回收技术	通过结晶反应将尿液中的磷以固态缓释肥的形式进行回收	磷酸铵镁结晶、磷酸镁钾结晶、羟基磷灰石结晶 ^[17-18]
电化学技术	利用尿液中含有大量离子的特点构建闭合电路,从中回收电能、氢气、清洁回用水等资源或能源	微生物燃料电池、微生物电解池等 ^[8,19-22]
膜技术	利用膜技术对尿液进行营养物质的富集浓缩或分离纯化,以获得高浓度、高纯度的资源化产品	正渗透膜、膜蒸馏、电渗析、离子交换、反渗透、纳滤等 ^[23-26]

表5 褐水和黑水资源化技术总结

Table 5 Summary of resource recovery techniques of brown water and black water

技术 Techniques	成熟度 Technical maturity	减量化效果 Waste reduction performance	资源回收效果 Resource recovery performance	成本 Cost	操作条件 Operation condition	存在问题 Problems
堆肥	成熟	较差	产出有机肥	低	<100℃,常压	受环境影响大,耗时长
厌氧消化	成熟	较差	产出有机肥	低	<100℃,厌氧	受环境影响大,耗时长
干化焚烧	较成熟	好	产出能量	较高	600~800℃,常压	原料不足时难以启动
超临界水氧化	理论可行	较好	产出清洁水	高	>374℃,21.8 MPa	需高温高压条件
焚烧发电	较成熟	好	产出电能	较高	高温,需脱水处理	高温,需较大规模
水热碳化	理论可行	好	产出清洁水、肥料	高	高温高压	结构复杂,维护困难
制生物燃料	较成熟	较好	产出燃料	较高	常温常压	需较大规模

表6 资源化厕所系统总结

Table 6 Summary of resource-oriented toilet systems

名称 Items	特点 Features	资源化产品 Products	成熟度 Technical maturity
循环水冲厕所	采用预处理+MBR技术去除污染物,适用于缺水 and 无下水道地区	清洁回用水	产品可供购买(TRL8)
移动式化粪池污泥处理系统	与卡车装配一体的脱水系统,适用于缺乏卫生设施的密集居民区	可将粪尿污泥加工成非饮用水	原型机(TRL5)
纳米膜厕所	采用无水冲厕方式,粪尿进行固体和液体沉降,固体废物提取后干燥并燃烧,液体经疏水膜纯化	清洁回用水	原型机(TRL5)
蓝色分集独立厕所	粪尿经源分离便器分质收集后,尿液经化学稳定和浓缩处理,之后经生物膜反应器、活性炭和电解处理,固体废物则通过超临界水氧化处理	清洁回用水	原型机(TRL4)
HTClean 高温处理新型厕所	排泄物在2.5 MPa压强下加热到160℃后形成小型滤饼和清洁水	清洁回用水	原型机(TRL6)

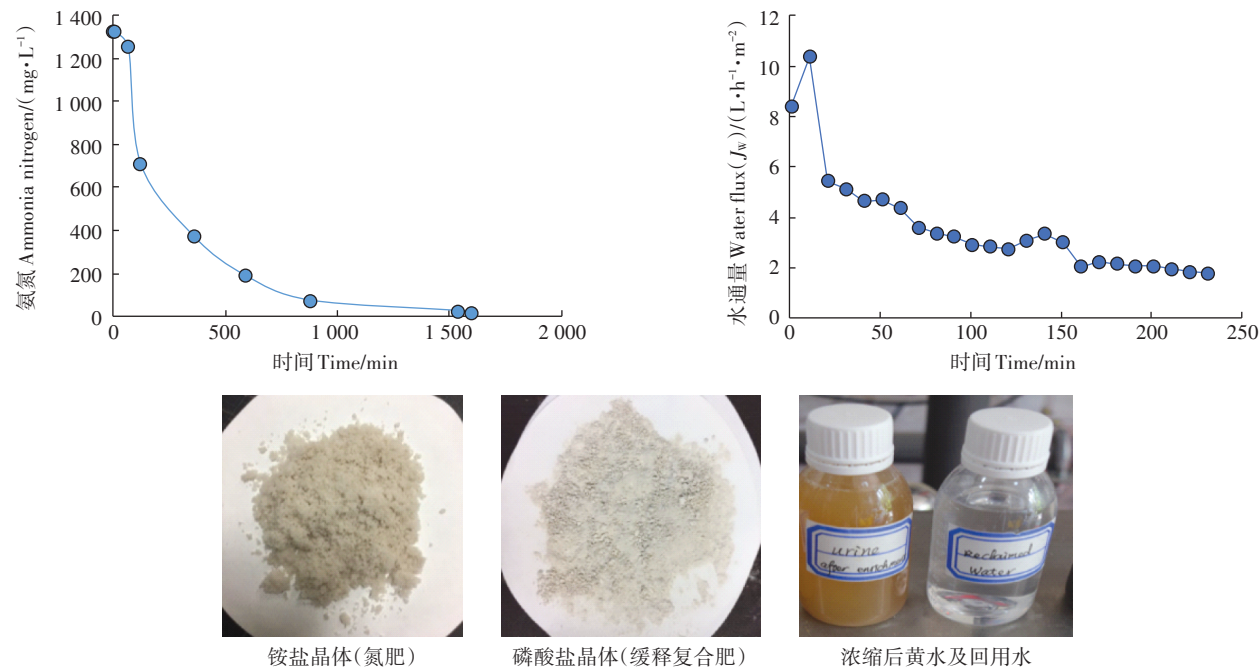


图2 全资源回收型厕所系统的运行效果

Figure 2 The performance of the resource-oriented toilet system

mg·L⁻¹;当使用3 mol·L⁻¹ NaCl溶液作为汲取液时,4 h连续运行正渗透膜水通量平均可达3.58 L·h⁻¹·m⁻²,水回收率可达74.67%。以上结果表明,氨氮吹脱-鸟粪

石结晶-正渗透膜集成技术可有效地对黄水进行资源化处理。

最后,笔者所在的研究团队将集成黄水资源化技

术和褐水厌氧发酵技术结合,设计了全资源化回收型厕所系统,为了更好地在农村地区应用,研究团队利用草木灰中和氨氮吸收过程中过量的酸,并将农作物秸秆用于混合厌氧发酵过程,最终形成了适用于农村

地区的全资源回收型厕所系统,见图3。

2.2 资源化厕所技术效益分析

各个系统的费用-效益流量表如表7所示,ENPV结果如图4所示。

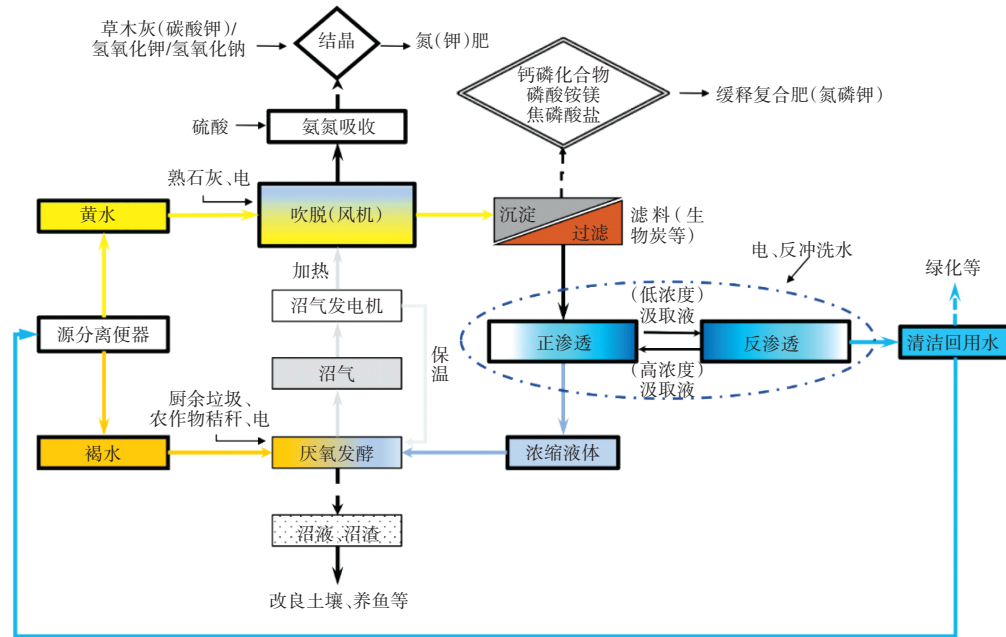


图3 全资源回收型厕所系统模式图

Figure 3 Diagram of the resource-oriented toilet system

表7 各系统费用-效益流量表(万元)

Table 7 Cost-benefit analysis results of the different toilet systems (10^4 yuan)

项目 Items	情景A Scenario A	情景B ₁ Scenario B ₁	情景B ₂ Scenario B ₂	情景C ₁ Scenario C ₁	情景C ₂ Scenario C ₂	情景C ₃ Scenario C ₃	情景C ₄ Scenario C ₄
土建及装修	9.74	13.34	13.34	15.34	15.34	16.54	16.54
卫生洁具、管道及管件	1.56	4.31	4.31	3.97	3.97	3.90	3.90
资源化处理设备	0	15.26	14.35	16.09	15.17	16.50	15.17
年耗水及污水处理	3.31	1.88	1.88	0.03	0.03	0	0
年耗电	0	0	0.68	0	0.69	0	0.10
给水设施建设	0.64	0.04	0.04	0.04	0.04	0	0
污水处理设施建设	16.60	11.11	11.11	0	0	0	0
年运行维护	2.40	3.36	3.32	4.56	4.52	6.38	6.32
年耗材	0	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
年折旧	0.54	1.56	1.52	1.68	1.64	1.76	1.69
固定资产残值	0.57	1.65	1.60	1.77	1.72	1.85	1.78
年产肥料	0	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
年产中水	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
年产沼气	0	0	0	2.66	2.66	2.66	2.66
年产沼肥	0	0	0	0.48	0.48	0.48	0.48
年垃圾减量化效益	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.02
年减少环境退化	0	2.18	-1.13	5.17	3.31	5.07	2.93
年节水效益	0	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57

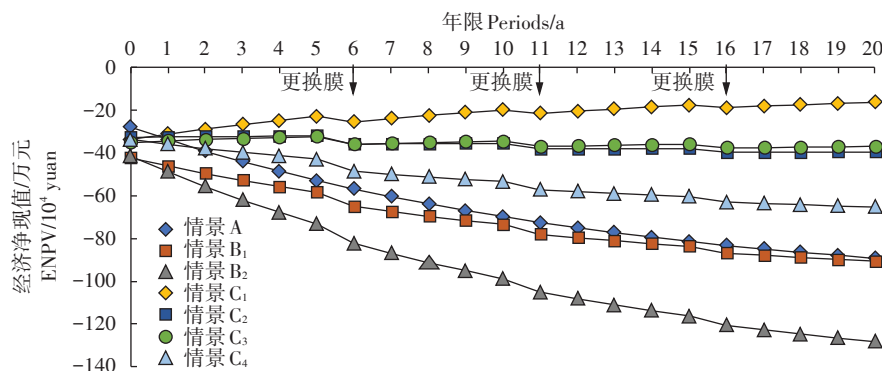


图4 各厕所系统的经济效益

Figure 4 The ENPV of different toilet systems

由图4可知,尽管所有厕所系统的ENPV均小于0,但情景B₁、情景B₂与完整下水道水冲式厕所系统的经济效益接近,而情景C₁~C₄的效益则优于完整下水道水冲式厕所,其ENPV相对情景A的ENPV分别提高了72.96、49.65、52.28、24.05万元,增幅分别为81.74%、55.62%、58.57%、26.94%。对粪尿均进行无害化、资源化处理的厕所系统(情景C₁~C₄)的经济效益优于仅对尿液进行资源化处理的厕所系统(情景B₁~B₂),这主要是因为情景B₁~B₂对黄水进行资源化处理后剩下的高浓度黄水和褐水的处理成本过高,而资源化获得的产品带来的经济补偿较低。使用太阳能电池可以较好地提高资源回收型厕所系统的经济效益,情景B₁相对于情景B₂提高了37.46万元,情景C₁相对于情景C₂提高了23.31万元,情景C₃相对于情景C₄提高了28.23万元,这主要是因为太阳能电池板的使用虽然增加了厕所系统的建设成本,但相对电网供电的环境效益,其环境成本(间接效益中减少环境退化成本)大幅降低,故而提升了情景B₁、情景C₁、情景C₃的经济效益。独立于市政给排水管网的厕所系统(情景C₃、情景C₄)相对于依靠市政给排水管网的厕所系统(情景C₁、情景C₂)而言,经济效益更差,情景C₃相对于情景C₁下降了20.68万元,情景C₄相对于情景C₂下降了25.61万元,这主要是因为与情景C₃、情景C₄依靠FO-RO膜系统处理地表水相比,自来水厂生产清洁水具有规模效应故而经济成本和环境成本均更低。此外,RO出水的水质高于自来水厂,处理过程的大量电耗带来了额外的环境成本,在实际应用过程中,可考虑将地表水进行简单地絮凝、沉淀、过滤处理,之后用作冲厕水以降低这部分成本。

从表7可以看出,情景B₁~B₂和C₁~C₄的固定成本远高于情景A,但在运行期间的净收益则优于情

景A。各个厕所系统的ENPV仍为负值(表明经济上项目不可行),主要是因为所采用的吹脱、结晶、正渗透等设备为自制设备,成本和运维、折旧费用较高,但随着相关技术的不断革新,以及资源回收型厕所系统大规模推广建设后带来的设备和产品的规模化、规范化生产效应,相关设备的价格会逐渐下降,从而提升厕所系统的经济效益,最终使得资源回收型厕所项目达到经济可行。各厕所系统的ENPV结果变化情况如图5所示。LCA结果如图6所示。从图6可以看出,将粪尿中的碳、氮、磷、钾等营养物质全部回收的情景C₁~C₄,其环境效益最优,相对于情景A,情景C₁~C₄在除TETP之外的所有环境影响类型上均具有更优的环境效益,具体的降幅如表8所示。

将资源回收型厕所系统的ENPV和环境效益结合起来分析可知,相对于完整下水道水冲式厕所(情景A),情景C₁~C₄在经济、环境效益上均更具优势。在有供排水管网的农村地区,应优先利用市政供水管网,选择情景C₁或者情景C₂,情景B₁也可作为替代完

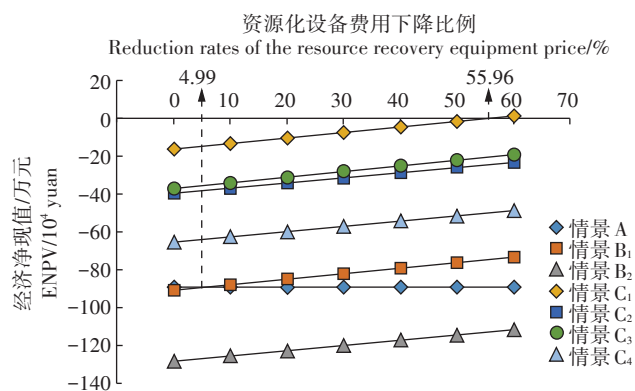
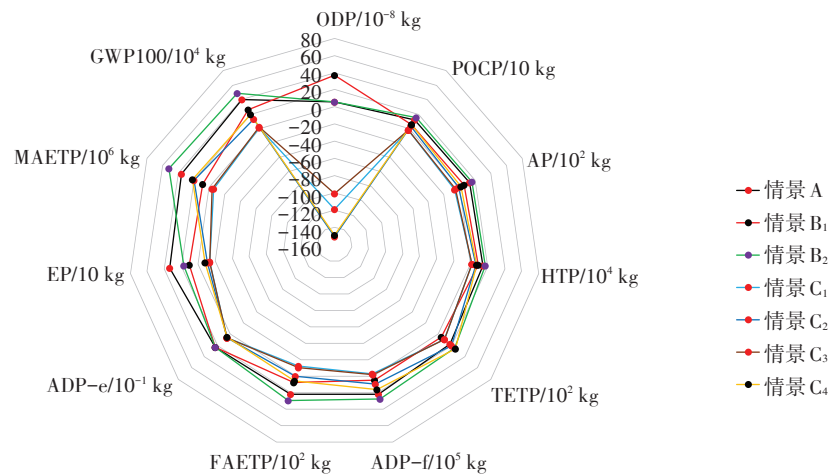


图5 粪尿资源化设备价格变化对厕所系统经济效益的影响

Figure 5 The impact of resource recovery equipment price changes on ENPV of the different toilet systems



GWP100: 100年全球变暖潜势(以CO₂计) Global warming potential(CO₂); ODP: 臭氧层破坏潜势(以R11计) Ozone layer depletion potential(R11); POCP: 光化学物质生成潜势(以乙烯计) Photochemical oxidation potential(ethene); AP: 酸化潜势(以SO₂计) Acidification potential(SO₂); HTP: 人类毒性潜势(以DCB计) Human toxicity potential(DCB); TETP: 土壤生态毒性潜势(以DCB计) Terrestrial ecotoxicity potential(DCB); ADP-f: 化石燃料类非生物资源消耗潜势(以MJ计) Abiotic depletion potential-fossil(MJ); FAETP: 淡水水生生态毒性潜势(以DCB计) Freshwater aquatic ecotoxicity potential(DCB); ADP-e: 元素类非生物资源消耗潜势(以Sb计) Abiotic depletion potential-elements (Sb); EP: 富营养化潜势(以磷酸盐计) Eutrophication potential(phosphate); MAETP: 海洋水生生态毒性潜势(以DCB计) Marine aquatic ecotoxicity potential(DCB)

图6 资源化厕所系统的环境影响

Figure 6 The environmental impacts of different toilet systems

表8 情景C₁~C₄相对于情景A环境影响的降幅(%)

Table 8 The degree of declining of the impact of scenario C₁~C₄ relative to scenario A(%)

环境影响类别 Impact category	情景 C ₁ Scenario C ₁	情景 C ₂ Scenario C ₂	情景 C ₃ Scenario C ₃	情景 C ₄ Scenario C ₄
100年全球变暖潜势(GWP100)	96.68	66.33	93.49	49.75
酸化潜势(AP)	148.28	108.59	143.83	87.03
富营养化潜势(EP)	141.02	131.14	138.92	124.91
臭氧层破坏潜势(ODP)	2 255.80	2 835.51	1 929.71	2 799.28
元素类非生物资源消耗潜势(ADP-e)	75.28	75.19	74.98	76.43
化石燃料类非生物资源消耗潜势(ADP-f)	112.60	55.43	108.30	26.46
淡水水生生态毒性潜势(FAETP)	152.91	98.82	147.98	71.70
人体毒性潜势(HTP)	88.97	56.85	87.40	52.19
海洋水生生态毒性潜势(MAETP)	114.97	46.65	110.59	40.48
光化学物质生成潜势(POCP)	115.33	73.61	112.30	52.21
土壤生态毒性潜势(TETP)	47.08	-19.88	45.03	-51.46

整下水道水冲式厕所的选择,而情景B₂在目前阶段则不适于应用;在无供排水管网的农村地区可选择情景C₃或情景C₄。在能源利用方面,资源回收型厕所系统在应用时,应充分利用太阳能等清洁能源以取得更好的经济和环境效益。

3 结论

(1)将吹脱回收氮、结晶回收磷、正渗透膜回收清洁水、厌氧发酵回收沼气等技术集成用于农村地区,

实现粪尿污染物的无害化、减量化、资源化,具有较好的运行效果。

(2)在本研究的公厕规模条件下,对粪尿均进行无害化、资源化处理的厕所系统的经济、环境效益均优于仅对尿液进行资源化处理的厕所系统和传统水冲厕所。

(3)在进行农村资源化厕所技术比选时,应充分考虑当地的供水供电条件,在缺乏供排水管网、供电网等基础设施的农村地区,建设对粪尿均进行无害

化、资源化处理的厕所系统综合效益最大。

参考文献:

- [1] 王永生, 刘彦随, 龙花楼. 我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 553-560. WANG Yong-sheng, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 553-560.
- [2] 原农业部. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. (2015-03-18)[2020-09-08]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwlmm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm. The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Action plan for zero growth of fertilizer use by 2020 [EB/OL]. (2015-03-18) [2020-09-08]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwlmm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
- [3] 熊英, 吴健. 化肥零增长: 回顾与启示[J]. 环境保护, 2017, 45(18): 57-60. XIONG Ying, WU Jian. Zero growth of fertilizer: Review and revelation[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(18): 57-60.
- [4] Benetto E, Nguyen D, Lohmann T, et al. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1506-1516.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴2018[R]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 40-42. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018: 40-42.
- [6] 住房和城乡建设部. 污水源分离排水系统工程技术导则: RISN-TG034—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guidelines for sewage source separation and drainage systems engineering: RISN-TG034—2018[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2018.
- [7] Maurer M, Pronk W, Larsen T A. Treatment processes for source-separated urine[J]. *Water Research*, 2006, 40(17): 3151-3166.
- [8] Xie M, Shon H K, Gray S R, et al. Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction[J]. *Water Research*, 2016, 89(4): 210-221.
- [9] Kuntke P, Sleuteles T H J A, Rodriguez A M, et al. (Bio)electrochemical ammonia recovery: Progress and perspectives[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2018, 102(9): 3865-3878.
- [10] Viotti P, Gavasci R. Scaling of ammonia stripping towers in the treatment of groundwater polluted by municipal solid waste landfill leachate: Study of the causes of scaling and its effects on stripping performance[J]. *Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2015, 10(2): 870-883.
- [11] Wu H, Dong R, Wu S. Exploring low-cost practical antifoaming strategies in the ammonia stripping process of anaerobic digested slurry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 344(6): 228-235.
- [12] 谢淘. 生物炭的特性分析及其在黄水资源化中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2015: 70-80. XIE Tao. Characterization of biochar and its application in yellow water treatment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015: 70-80.
- [13] Manto M J, Xie P, Keller M A, et al. Recovery of ammonium from aqueous solutions using ZSM-5[J]. *Chemosphere*, 2018, 198(4): 501-509.
- [14] Kavvada O, Tarpeh W A, Horvath A, et al. Life-cycle cost and environmental assessment of decentralized nitrogen recovery using ion exchange from source-separated urine through spatial modeling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12061-12071.
- [15] Piltz B, Melkonian M. Immobilized microalgae for nutrient recovery from source-separated human urine[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 30(1): 421-429.
- [16] Mayer B K, Baker L A, Boyer T H, et al. Total value of phosphorus recovery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 6606-6620.
- [17] Wilsenach J A, Schuurbijs C A, Van L M C. Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation [J]. *Water Research*, 2007, 41(2): 458-466.
- [18] Peng L, Dai H, Wu Y, et al. A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes[J]. *Chemosphere*, 2018, 197(8): 768-781.
- [19] Zou S, He Z. Efficiently "pumping out" value-added resources from wastewater by bio-electrochemical systems: A review from energy perspectives[J]. *Water Research*, 2018, 131(4): 62-73.
- [20] Sotres A, Cerrillo M, Vinas M, et al. Nitrogen removal in a two-chambered microbial fuel cell: Establishment of a nitrifying-denitrifying microbial community on an intermittent aerated cathode[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284(3): 905-916.
- [21] Zou S, Qin M, Moreau Y, et al. Nutrient-energy-water recovery from synthetic sidestream centrate using a microbial electrolysis cell-forward osmosis hybrid system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154(5): 16-25.
- [22] Kuntke P, Rodriguez A M, Widyakristi L, et al. Hydrogen gas recycling for energy efficient ammonia recovery in electrochemical systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(5): 3110-3116.
- [23] Ledezma P, Jermakka J, Keller J, et al. Recovering nitrogen as a solid without chemical dosing: Bio-electroconcentration for recovery of nutrients from urine[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2017, 4(3): 119-124.
- [24] Ward A J, Arola K, Thompson B E, et al. Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis[J]. *Water Research*, 2018, 135(6): 57-65.
- [25] Wang X, Zhang X, Wang Y, et al. Simultaneous recovery of ammonium and phosphorus via the integration of electrodialysis with struvite reactor[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 490(7): 65-71.
- [26] Wang Y K, Geng Y K, Pan X R, et al. In situ utilization of generated electricity for nutrient recovery in urine treatment using a selective electrodialysis membrane bioreactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 171(5): 451-458.